



## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ

Д.В. Тихвинский<sup>1</sup>, Ю.О. Куянова<sup>1</sup>, А.В. Бервицкий<sup>1,3</sup>, Н.Р. Обединская<sup>1,2</sup>, А.А. Тулупов<sup>1,2</sup>, Д.В. Паршин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Лаврентьева, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630090; <sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт «Международный томографический центр» Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Институтская, 3А, Новосибирск, Российская Федерация, 630090; <sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр нейрохирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Новосибирск), Немировича-Данченко, 132/1, Новосибирск, Российская федерация, 630087

### Основные положения

- Малые церебральные аневризмы (<3 мм), составляющие большую часть всех аневризм в абсолютном выражении, разрываются чаще, хотя стандартные (>3 мм) и большие (>15 мм) имеют больший риск разрыва. В данной работе впервые показано, что критерии риска разрыва, установленные для больших церебральных аневризм, не применимы к малым аневризмам. Исследовано развитие малых аневризм у реальных пациентов и выполнено сравнение измеренных морфологических характеристик аневризм с их рассчитанными гидродинамическими характеристиками.

#### Цель

Изучить динамику развития малых церебральных аневризм, оценить применимость существующих методик расчета риска разрыва, сформулировать новые уточняющие гипотезы расчета риска разрыва малых церебральных аневризм.

#### Материалы и методы

Данные пациентов предоставлены Федеральным центром нейрохирургии г. Новосибирска. КТ-ангиография выполнена на томографе Philips Ingenuity (Philips Medical Systems, США; 128 срезов). Динамика размеров аневризм оценена путем измерения трех основных размеров с точностью до 0,1 мм в программной среде IntelliSpace Portal Philips. Численные расчеты произведены в ANSYS CFX 2020R2.

#### Результаты

Гемодинамические характеристики меняются в направлении изменения купола аневризмы. В случае когда морфологические характеристики аневризмы не менялись, наблюдалось изменение геометрии Виллизиева круга пациента: кривизна артерий, углы бифуркаций (структура круга оставалась неизменной). Критерий разрыва аневризмы PHASES оказался неприменим для рассмотренных аневризм.

#### Заключение

В настоящей работе впервые сформулировано и подтверждено на данных добровольцев как морфологически, так и гидродинамически, что на изменение рисков оценок для малых аневризм принципиальное влияние оказывает даже незначительное перестроение Виллизиева круга: изменение (тавтология) кривизны отдельных сегментов церебральных артерий, а также углов их бифуркаций. Полученный результат направлен на модификацию существующих рисков критериев разрыва церебральных аневризм.

#### Ключевые слова

Церебральные аневризмы • Малые аневризмы • Риск разрыва • Виллизиев круг • Гемодинамика • Структура Виллизиева круга

Поступила в редакцию: 02.12.2022; поступила после доработки: 30.12.2022; принята к печати: 17.01.2023

Для корреспонденции: Денис Вячеславович Тихвинский, nabster98@yandex.ru; адрес: пр. Лаврентьева, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630090

Corresponding author: Denis V. Tikhvinskii, nabster98@yandex.ru; address: 15, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, Russian Federation, 630090

## DYNAMIC MONITORING OF MORPHOLOGICAL AND HEMODYNAMIC EVOLUTION OF SMALL CEREBRAL ANEURYSMS

D.V. Tikhvinskii<sup>1</sup>, Yu.O. Kuyanova<sup>1</sup>, A.V. Bervitskiy<sup>1,3</sup>, N.R. Obedinskaya<sup>1,2</sup>, A.A. Tulupov<sup>1,2</sup>, D.V. Parshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentyev Institute of Hydrodynamics” of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 15, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, Russian Federation, 630090; <sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution of Science “International Tomography Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3A, Institutskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630090; <sup>3</sup> Federal State Budgetary Institution “Federal Neurosurgical Center”, 132/1, Nemirovicha-Danchenko St., Novosibirsk, Russia, 630087

### Highlights

- Small cerebral aneurysms (<3 mm), which make up the majority of aneurysms, rupture more frequently, although medium (>3 mm) and giant (>15 mm) aneurysms and have a higher risk of rupture. This article proves for the first time that the rupture risk criteria developed for giant cerebral aneurysms do not work for small aneurysms. The development of small aneurysms in patients was analyzed and measured morphological features of aneurysms were compared with their calculated hydrodynamic characteristics.

**Aim** To study the dynamics of development of small cerebral aneurysms, to assess the applicability of existing methods for calculating the risk of rupture, to formulate new clarifying hypotheses for calculating the risk of rupture of small cerebral aneurysms.

**Methods** Patient data were provided by the Federal Center for Neurosurgery, Novosibirsk. CT angiography was performed using a Philips Ingenuite CT scanner (Philips Medical Systems, USA, 128 slices). Aneurysm size dynamics was assessed by measuring three main sizes with an accuracy of 0.1 mm using the IntelliSpace Portal Philips software environment. Numerical calculations were carried out using ANSYS CFX 2020R2.

**Results** Hemodynamic characteristics change according to the changes of the aneurysm dome. In the case when morphological characteristics of the aneurysm have not changed, a change in the geometry of the patient's circle of Willis (coW) is observed: the curvature of the arteries, the angles of bifurcations (the structure of coW remained unchanged). The PHASES score (absolute risks of rupture for aneurysms) was found to be unusable for the considered aneurysms.

**Conclusion** This work formulates and morphologically and hydrodynamically confirms for the first time in the volunteers that the change in risk estimates for such aneurysms is fundamentally affected, even insignificantly, by the change in the circle of Willis: a change in the curvature of individual segments of the cerebral arteries, as well as the angles of their bifurcations. The results obtained are aimed at modifying the existing risk criteria for rupture of cerebral aneurysms.

**Keywords** Cerebral aneurysms • Small aneurysms • Risk of rupture • Circle of Willis • Hemodynamics • Structure of the circle of Willis

*Received: 02.12.2022; received in revised form: 30.12.2022; accepted: 17.01.2023*

### Список сокращений

КТ – компьютерная томография WSS – wall shear stress (касательное напряжение на стенке)

### Введение

Церебральные аневризмы – широко распространенное социально значимое заболевание. Несмотря на невысокий риск разрыва (примерно 0,5%) [1, 2], они играют существенную роль в пе-

рестройке церебрального кровообращения, а также способны вызвать его острое нарушение по ишемическому или геморрагическому типу [3]. В настоящее время применяют как эндоваскулярные и микрохирургические, так и смешанные

техники, особенно при лечении множественных аневризм [4, 5]. Тем не менее важной дилеммой для хирурга является принятие решения о проведении оперативного вмешательства, особенно в случае наличия у пациента малой неразрывавшейся аневризмы.

В литературе описано большое количество работ, посвященных анализу рисков разрыва церебральных аневризм [6, 7] и даже составлению калькуляторов риска их разрыва. Наиболее распространенная, а также клинически проверенная методика подсчета риска разрыва носит название PHASES и включает следующие рисковые переменные: «национальность», «гипертензия», «возраст», «размер», «факт предшествующих кровоизлияний из других аневризм», «локализация аневризмы» (Population, Hypertension, Age, Size of aneurysm, Earlier SAH from another aneurysm, Site of aneurysm) [8]. Существуют модификации данной методики, в которых учтены не только информация о больном, но и набор его морфологических и гемодинамических факторов [9].

В настоящей работе приведены первые результаты динамического наблюдения группы лиц с церебральными аневризмами. На протяжении нескольких лет проведены контрольные компьютерные томографические (КТ) исследования, по результатам которых определены морфологические и гемодинамические параметры аневризм. Впервые качественно оценена связь указанных параметров и статуса аневризмы у одного пациента.

## Материалы и методы

### Методика подбора пациентов

Пациенты с интракраниальными аневризмами, не отвечающими критериям показаний к хирургическому вмешательству, осмотрены в поликлинике Федерального центра нейрохирургии г. Новосибирска в период с января 2014 г. по декабрь 2020 г. Диагноз интракраниальной аневризмы верифицирован при наличии данных мультиспиральной компьютерной ангиографии интракраниальных артерий. Ввиду миллиарного размера аневризм (до 3 мм) и/или отказа больного от оперативного вмешательства тактика ведения данной группы предполагала динамическое наблюдение. Динамическое наблюдение включало мультиспиральную компьютерную ангиографию интракраниальных артерий через 6 мес. с момента установки диагноза, через год и далее каждые три года при отсутствии динамики рентгенологической картины. В случае изменения морфологических характеристик аневризм предложено оперативное вмешательство. В исследование включены три пациента, все – женщины. Больные первично поступили в Федеральный центр нейрохирургии (г. Новосибирск) по направлению невролога с подозрением

на наличие сосудистых патологий церебральных артерий. Возраст пациента 1 в ходе первичного и последующих (в скобках) исследований составил 39 (42) лет, пациента 2 – 46 (47,50) лет, пациента 3 – 34 (39) года.

Все участники исследования подписывали добровольное информированное согласие на прохождение обследования с возможностью включения анонимизированных результатов в публикации по тематике работы.

### Методика сканирования и измерения морфологических параметров исследуемых аневризм

КТ-ангиография интра- и экстракраниальных артерий выполнена на томографе Philips Ingenuity (Philips Medical Systems, США; 128 срезов). Перед исследованием пациентам в правую кубитальную вену устанавливали периферический венозный катетер размером 18 или 20G. Контрастный препарат («Ультравист 370», Bayer Schering Pharma, Германия) вводили со скоростью 4,5–5 мл/с с помощью автоматического шприца-инжектора. Объем контрастного препарата составлял 60 мл [10].

После стандартной укладки и позиционирования пациента выполнено планирование исследования по данным двух топограмм в прямой и боковой проекциях от уровня дуги аорты до контура мягких тканей теменной области с каудокраниальным направлением сканирования. Исследование проведено с использованием болус-трекинга на уровне дуги аорты. Толщина среза составляла 0,9 мм. На рабочей станции Portal Philips (v.6.0.3) построены MIP-, MPR-, VRT-реформации в режиме 3D. Пример результатов сканирования представлен на рис. 1.

Анализ полученных изображений включал определение наличия и количества аневризм, их локализации и соотношения с костными структурами, размеров (диаметр купола и шейки аневризмы) и формы, обызвествления стенки и пристеночных тромбов, оценку анатомии Виллизиева круга, извитостей и сужений просветов брахиоцефальных артерий [11].

Динамика размеров аневризм определена путем измерения трех основных размеров с точностью до 0,1 мм в программной среде IntelliSpace Portal [12]:

1) N (neck) – шейка, диаметр наиболее широкой части шейки аневризмы;

2) H (height) – высота аневризмы, расстояние от шейки до наиболее удаленной части купола аневризмы, измеренное перпендикулярно диаметру шейки;

3) W (width) – ширина аневризмы, диаметр аневризмы в наиболее широкой части, измеренный перпендикулярно высоте; в случае неправильной (неокруглой) конфигурации аневризмы два взаимопер-

пендикулярных измерения, отражающие больший и меньший диаметры.

Критерием роста аневризмы считали увеличение более чем на 1 мм минимум в одном измерении или более чем на 0,5 мм в двух измерениях или явное изменение формы аневризмы.

### Восстановление геометрии системы крупных церебральных сосудов с патологией из реальных клинических случаев

На основе данных КТ-ангиографии получены массивы медицинских DICOM-изображений. Для реконструкции геометрии массив данных с заданными параметрами обрабатывали в специализированной программе сегментации медицинских 3D-изображений ITK-Snap [13]. Задача восстановления сосудистой сети состоит в том, чтобы определить границы трехмерной области с некоторым заданным значением интенсивности, разделяющим сосуды и не сосуды. Необходимо правильно задать порог интенсивности, ограничив его снизу для подавления шумов и сверху для исключения с изображения костей (рис. 2).

### Методика численного расчета

Для каждой из построенных конфигураций в пакете ANSYS CFX 2020R2 (лицензия ИГиЛ СО РАН) проведены численные расчеты без учета эффекта взаимодействия кровотока со стенкой артерии (задача с жесткими стенками). Решатель CFX использует метод конечных объемов, центрированный по узлу [14]. Для решения использована стандартная схема [15–17], реализованная в пакете ANSYS CFX 2020R2 [14]. Применена неструктурированная тетраэдрическая сетка, которая является «золотым стандартом» при расчетах гидродинамики областей течения с циркуляцией [14]. Для корректной реализации условий прилипания в численной постановке использован призматический слой ячеек вдоль стенок сосуда. Подобная постановка рекомендована для описания течения вязкой несжимаемой жидкости [14]. Для задания граничных условий на границах типа Inlet в Виллизиевом круге пациентов был задан равномерный поток: во внутренние сонные артерии –

с расходом 4,5 г/с, в базилярную (если она необходима) – с расходом 3,55 г/с [18]. Также на каждой границе типа outlet задано условие типа opening, которое в случае возникновения рядом с ними вихрей позволяло жидкости свободно протекать обратно в конфигурацию. Давление на этих границах полагалось нулевым.

## Результаты

### Морфологические измерения

В работе приведены результаты морфологических измерений и гидродинамических расчетов для трех пациентов с наиболее похожими по локализации аневризмами, демонстрирующими при этом разную динамику.

По представленным данным (табл. 1), наиболее стабильным следует считать пациента 3, у которого отмечено незначительное изменение ширины купола аневризмы (около 0,1 мм за 5 лет), что

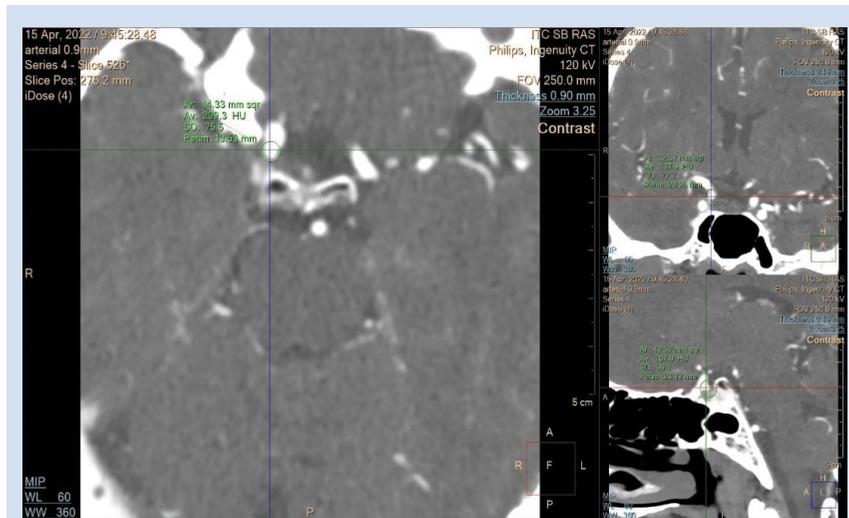


Рисунок 1. Изображение методики измерения морфологических параметров рассмотренных аневризм для пациента 2

Figure 1. The image showing the technique for measuring morphological parameters of the considered aneurysms for Patient 2

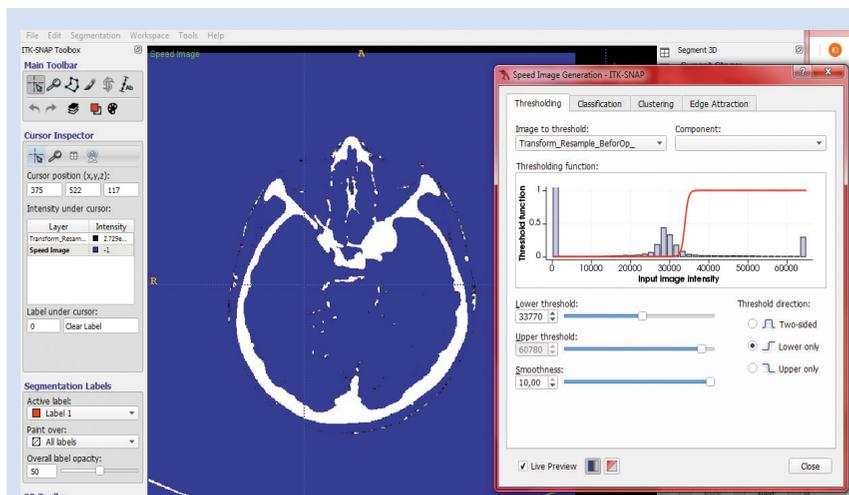


Рисунок 2. Изображение диалогового окна программы ITC-Snap: DICOM-изображение среза пациента 2, настройка порогов контрастности для удаления из изображения костей, вещества мозга и прочих артефактов

Figure 2. The image showing the dialog box of the ITC-Snap program: slice of a DICOM image of Patient 2 and a removal of bones, brain matter and other artifacts

можно отнести к погрешности измерения этой величины из-за разницы в качестве снимков. При этом у двух других больных выявлена динамика роста аневризм. Также у пациента 1 отмечено изменение ширины купола аневризмы при стабильной длине и шейке аневризмы, а у пациента 2 зарегистрирован более чем 50% рост аневризмы по всем измерениям.

### Численные расчеты

При анализе результатов численных расчетов можно отметить, что у пациента 3 за 5 лет наблюдений средняя скорость кровотока в зоне аневризмы уменьшилась примерно на 10% (табл. 2). При этом значения касательных напряжений также снизились в среднем на 35%.

У пациентов с выявленным увеличением аневризмы по морфологическим признакам при незначительном росте аневризмы гемодинамика WSS была практически стабильна, при этом наблюдался 5% рост средней скорости вблизи аневризмы.

**Таблица 2.** Максимальная скорость кровотока (м/с) в зоне аневризмы

**Table 2.** Maximum blood flow velocity (m/s) in the aneurysm area

Случай / Case	2016–2018	2019–2020	2021–2022
Пациент 1 / Patient 1	–	1,05	1,10
Пациент 2 / Patient 2	1	1,65	1,81
Пациент 3 / Patient 3	1,12	–	0,99

В случае же когда, по данным морфологического анализа, аневризма выросла более чем в полтора раза, можно отметить существенное повышение средних скоростей в системе в первые два года (на 65%) и еще на 10% в последующие два (рис. 3). При этом в первые два года зарегистрирован резкий рост WSS, в то время как в последующие два наблюдается откат значений WSS в сторону исходных (рис. 4, табл. 3).

### Обсуждение

В работах [19, 20] подчеркнута важность такой величины, как WSS (wall shear stress, касательное напряжение на стенке), и ее производных (oscillatory shear index, WSS gradients и др.). Поскольку предикторами разрыва считают как высокие, так и низкие значения WSS помимо WSS и производных от него функций необходимо рассматривать дополнительные факторы. Так, анализ морфологических и гидродинамических характеристик конкретных пациентов на протяжении ряда лет показал, что этот параметр значимо не влияет на рост аневризмы. В большей степени ее рост определяет скорость кровотока вблизи аневризмы. Отметим, что для всех конфигураций каждого конкретного пациента использованы одни и те же граничные условия. Кроме того, наибольшему росту был подвержен купол аневризмы, а зона шейки оставалась более стабильной. Тем самым влияние аневризмы на гидродинамику системы не должно существенно меняться, однако в двух случаях определено существенное изменение ги-

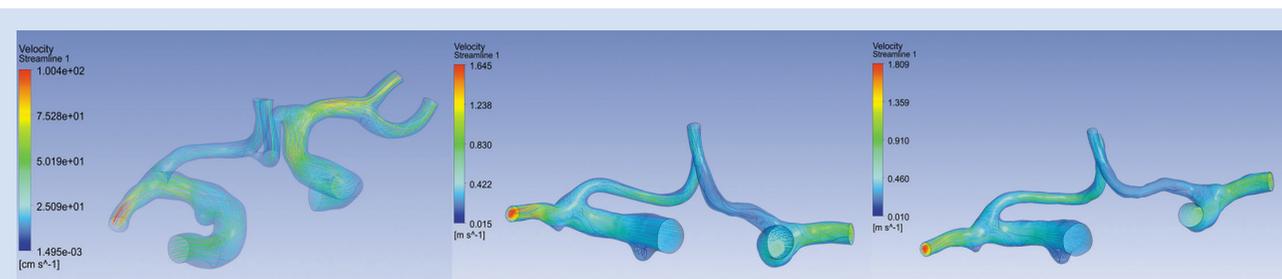
**Таблица 1.** Морфологические характеристики рассмотренных пациентов

**Table 1.** Morphological characteristics of the patients

Случай / Case	Локализация аневризмы / Location of the aneurism	2016–2018			2019–2020			2021–2022		
		H	W	N	H	W	N	H	W	N
Пациент 1 / Patient 1	C6 (офтальмический сегмент) левой ВСА / C6 (ophthalmic segment) of the left ICA	–	–	–	3,8	6,2×4,3	4,1	3,8	6,6×4,6	4,1
Пациент 2 / Patient 2	C6 (офтальмический сегмент) правой ВСА / C6 (ophthalmic segment) of the right ICA	1,9	2,1	2,5	2	2,1	3	2,3	2,3	3
Пациент 3 / Patient 3	C7, (коммуникантный сегмент) левой ВСА / C7 (terminal segment) of the left ICA	1,7	2,3	2,6	–	–	–	1,7	2,2	2,6

**Примечание:** H – высота; W – ширина; N – шейка, измерения в мм; ВСА – внутренняя сонная артерия.

**Note:** H – height; W – width; N – neck, measurements in mm; ICA – internal carotid artery.



**Рисунок 3.** Линии тока в Виллизиевом круге вблизи аневризмы для пациента 2: 2016–2018, 2019–2020 и 2021–2022 гг. (слева направо)

**Figure 3.** Streamlines in the circle of Willis near the aneurysm for Patient 2 2016–2018, 2019–2020, 2021–2022 (from left to right)

дродинамики при тех же данных на входе в конфигурацию. Из этого следует, что геометрия церебральных (кривизна сосудов и углы их бифуркаций) сосудов значительно меняется в двух случаях от года к году. Указанное изменение ведет в некоторых случаях к существенной перестройке гемодинамики, что отражается на риске роста и последующего разрыва интракраниальных аневризм. В то же время структура Виллизиева круга остается неизменной.

Таким образом, важными для анализа динамики развития аневризмы действительно являются характеристики, участвующие в оценке PHASES [20] и которые для настоящих случаев приведены в табл. 4. Представленные значения рассчитаны следующим образом:  $0(\text{population}) + 0(\text{hypertension}) + 0(\text{age}) + 0(\text{size}) + 0(\text{earlier SAH}) + 0(\text{site}) = 0$ .

Несмотря на то что рискованная оценка PHASES для рассмотренных пациентов равна 0, данные морфологических и гидродинамических измерений свидетельствуют о явном росте аневризмы у двух больных, причем о существенном росте для одного из них. Это в свою очередь указывает на не-

обходимость модификации существующего клинического критерия.

К безусловным ограничениям настоящей работы следует отнести малую выборку, а также необходимость выделения различных видов конфигурации Виллизиева круга. Мы предполагаем, что некоторые из них в наибольшей степени подвержены пространственной реконфигурации, что приводит к перестройке гемодинамики и возможному увеличению риска разрыва аневризм.

## Заключение

Проанализированы данные динамического наблюдения морфологических и гидродинамических характеристик трех пациентов с интракраниальными аневризмами. У одного из больных аневризма оценена как стабильная, у двух других отмечен рост аневризм (в одном случае существенный). Анализ количественных характеристик показал, что наибольший рост рассмотренных аневризм обнаружен в направлении увеличения объема купола и при этом большее влияние на этот рост оказывало увеличение средних скоростей, а не повышение величины касательных напряжений. Из этого можно сделать вывод, что трехмерная структура церебральных сосудов у двух пациентов претерпела изменения таким образом, что гемодинамически провоцировала рост имевшихся аневризм. Проведенное исследование направлено на уточнение рисков критериев разрыва церебральных аневризм для российского населения.

## Конфликт интересов

Д.В. Тихвинский заявляет об отсутствии конфликта интересов. Ю.О. Куянова заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.В. Бервицкий заявляет об отсутствии конфликта интересов. Н.Р. Обединская заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.А. Тулупов заявляет об отсутствии конфликта интересов. Д.В. Паршин заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10034).

**Таблица 3.** Максимальные значения WSS (Pa) в Виллизиевом круге

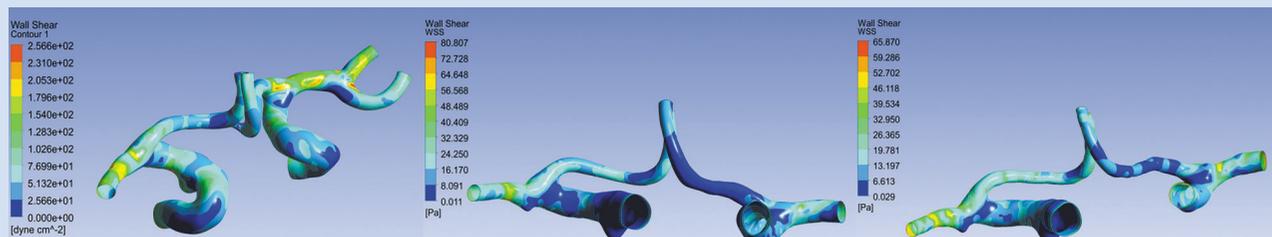
**Table 3.** Maximum values of WSS (Pa) in the circle of Willis

Случай / Case	2016–2018	2019–2020	2021–2022
Пациент 1 / Patient 1	–	31,22	30,64
Пациент 2 / Patient 2	25,66	80,81	65,87
Пациент 3 / Patient 3	37,83	–	24,14

**Таблица 4.** Значение рискованного критерия PHASES для рассмотренных случаев по годам

**Table 4.** PHASES score for the considered cases by years

Случай / Case	Рискованная оценка за год / Risk assessment for the year		
	2016–2018	2019–2020	2021–2022
Пациент 1 / Patient 1	–	0	0
Пациент 2 / Patient 2	0	0	0
Пациент 3 / Patient 3	0	–	0



**Рисунок 4.** Значения касательных напряжений (WSS) в Виллизиевом круге вблизи аневризмы для пациента 2: 2016–2018, 2019–2020 и 2021–2022 гг. (слева направо)

**Figure 4.** Shear stress values (WSS) in the circle of Willis near the aneurysm for Patient 2: 2016–2018, 2019–2020, 2021–2022 (from left to right)

**Информация об авторах**

*Тихвинский Денис Вячеславович*, старший лаборант-исследователь федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-8661-5345

*Куюнова Юлия Олеговна*, младший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-0359-648X

*Бервицкий Анатолий Владимирович*, лаборант федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; врач-нейрохирург федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный центр нейрохирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Новосибирск), Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-9034-2212

*Обединская Наталья Ростиславовна*, лаборант федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; врач-рентгенолог федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт «Международный томографический центр» Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0000-0001-8279-8738

*Тулупов Андрей Александрович*, доктор медицинских наук, член-корр. РАН ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; заведующий лабораторией МРТ технологий федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт «Международный томографический центр» Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-1277-4113

*Паршин Даниил Васильевич*, старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-2496-3042

**Author Information Form**

*Tikhvinskii Denis V.*, Senior Research Assistant at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-8661-5345

*Kuyanova Yulia O.*, Junior Researcher at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-0359-648X

*Bervitskiy Anatoly V.*, Laboratory Assistant at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Neurosurgeon at the Federal State Budgetary Institution “Federal Neurosurgical Center” of the Ministry of Health of the Russian Federation (Novosibirsk), Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-9034-2212

*Obedinskaya Natalia R.*, Laboratory Assistant at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Radiologist at the Federal State Budgetary Institution of Science “International Tomography Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0000-0001-8279-8738

*Tulupov Andrey A.*, MD, PhD, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Leading Researcher at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Head of the Laboratory of MRI Technologies, Federal State Budgetary Institution of Science, Institute "International Tomographic Center" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-1277-4113

*Parshin Daniel V.*, Senior Researcher at the Federal State Budgetary Institution of Science “Lavrentiev Institute of Hydrodynamics” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-2496-3042

**Вклад авторов в статью**

*ТДВ* – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*КЮО* – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*БАВ* – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*ОНР* – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

**Author Contribution Statement**

*TDV* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*KYuO* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*BAV* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*ONR* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*ТИА* – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*ПДВ* – вклад в концепцию исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*ТИА* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*PDV* – contribution to the concept of the study, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Rinkel G.J., Djibuti M., Algra A., van Gijn J. Prevalence and risk of rupture of intracranial aneurysms: a systematic review. *Stroke*. 1998;29(1):251-6. doi: 10.1161/01.str.29.1.251.
- International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial Aneurysms Risk of Rupture and Risk of surgical intervention. *N. Engl. J. Med.* 1998; 339:1725–1733. doi: 10.1056/NEJM199812103392401.
- Salvadori E., Papi G., Insalata G., Rinnoci V., Donnini I., Martini M., Falsini C., Hakiki B., Romoli A., Barbato C., Polcaro P., Casamorata F., Macchi C., Cecchi F., Poggesi A. Comparison between Ischemic and Hemorrhagic Strokes in Functional Outcome at Discharge from an Intensive Rehabilitation Hospital. *Diagnostics (Basel)*. 2020;11(1):38. doi: 10.3390/diagnostics11010038.
- Hoh B.L., Putman C.M., Budzik R.F., Carter B.S., Ogilvy C.S. Combined surgical and endovascular techniques of flow alteration to treat fusiform and complex wide-necked intracranial aneurysms that are unsuitable for clipping or coil embolization. *J Neurosurg*. 2001;95(1):24-35. doi: 10.3171/jns.2001.95.1.0024.
- Andaluz N., Zuccarello M. Treatment strategies for complex intracranial aneurysms: review of a 12-year experience at the university of cincinnati. *Skull Base*. 2011;21(4):233-42. doi: 10.1055/s-0031-1280685.
- Khe A.K., Chupakhin A.P., Cherevko A.A., Eliava S.S., Pilipenko Y.V. Viscous dissipation energy as a risk factor in multiple cerebral aneurysms. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model*. 2015; 30(5): 277–287. doi: 10.1515/rnam-2015-0025
- Dhar S., Tremmel M., Mocco J., Kim M., Yamamoto J., Siddiqui A.H., Hopkins L.N., Meng H. Morphology parameters for intracranial aneurysm rupture risk assessment. *Neurosurgery*. 2008;63(2):185-96; discussion 196-7. doi: 10.1227/01.NEU.0000316847.64140.81.
- Greving J.P., Wermer M.J., Brown R.D.Jr., Morita A., Juvela S., Yonekura M., Ishibashi T., Torner J.C., Nakayama T., Rinkel G.J., Algra A. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: a pooled analysis of six prospective cohort studies. *Lancet Neurol*. 2014;13(1):59-66. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70263-1.
- Neyazi B., Swiatek V.M., Skalej M., Beuing O., Stein K.P., Hattingen J., Preim B., Berg P., Saalfeld S., Sandalcioglu I.E. Rupture risk assessment for multiple intracranial aneurysms: why there is no need for dozens of clinical, morphological and hemodynamic parameters. *Ther Adv Neurol Disord*. 2020;13:1756286420966159. doi: 10.1177/1756286420966159.
- Руководство для рентгенолаборантов по выполнению протоколов исследований на компьютерном томографе: учебно-методическое пособие. Сост. В. А. Гомболевский, С. П. Морозов, В. Ю. Чернина. М.: ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ»; 2020
- Церебральные аневризмы. Нетравматическое субарахноидальное кровоизлияние. Методические рекомендации. сост. В.В. Крылов, А.А. Гринь, А.В. Природов. М.: ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»; 2021
- Backes D., Vergouwen M.D., Tiel Groenestege A.T., Bor A.S., Velthuis B.K., Greving J.P., Algra A., Wermer M.J., van Walderveen M.A., terBrugge K.G., Agid R., Rinkel G.J. PHASES Score for Prediction of Intracranial Aneurysm Growth. *Stroke*. 2015;46(5):1221-6. doi: 10.1161/STROKEAHA.114.008198.
- Yushkevich P.A., Piven J., Hazlett H.C., Smith R.G., Ho S., Gee J.C., Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage*. 2006;31(3):1116-28. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.01.015..
- ANSYS. ANSYS Documentation, ANSYS CFX-Solver Theory Guide. <http://www.ansys.com/2006>.
- Kuyanovа Y.O., Chupakhin A.P., Parshin D.V., Presnyakov S.S., Dubovoi A.V. Numerical Study of the Tee Hydrodynamics in the Model Problem of Optimizing the Low-Flow Vascular Bypass Angle. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60 (6): 1038–1045. doi: 10.1134/S0021894419060087
- Kuianovа Iu.O., Dubovoy A.V., Parshin D V . Towards the numerical assessment in solving the problem of the effectiveness of vascular anastomosis in neurosurgical operations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1359:012085. doi 10.1088/1742-6596/1359/1/012085
- Tikhvinskii D., Kuianovа J., Kislitsin D., Orlov K., Gorbatykh A., Parshin D. Numerical Assessment of the Risk of Abnormal Endothelialization for Diverter Devices: Clinical Data Driven Numerical Study. *J Pers Med*. 2022;12(4):652. doi: 10.3390/jpm12040652.
- Zarrinkoob L., Ambarki K., Wåhlin A., Birgander R., Eklund A., Malm J. Blood flow distribution in cerebral arteries. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2015;35(4):648-54. doi: 10.1038/jcbfm.2014.241.
- Etminan N., Rinkel G.J. Unruptured intracranial aneurysms: development, rupture and preventive management. *Nat Rev Neurol*. 2016;12(12):699-713. doi: 10.1038/nrneuro.2016.150.
- Oliveira I., Gasche J. L., Militzer Ju., Baccin C. Hemodynamic and morphological case study of an intracranial aneurysm inception and evolution. 25th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019. 20-25 October. 2019. doi: 10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0516

## REFERENCES

- Rinkel G.J., Djibuti M., Algra A., van Gijn J. Prevalence and risk of rupture of intracranial aneurysms: a systematic review. *Stroke*. 1998;29(1):251-6. doi: 10.1161/01.str.29.1.251.
- International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial Aneurysms Risk of Rupture and Risk of surgical intervention. *N. Engl. J. Med.* 1998; 339:1725–1733. doi: 10.1056/NEJM199812103392401.
- Salvadori E., Papi G., Insalata G., Rinnoci V., Donnini I., Martini M., Falsini C., Hakiki B., Romoli A., Barbato C., Polcaro P., Casamorata F., Macchi C., Cecchi F., Poggesi A. Comparison between Ischemic and Hemorrhagic Strokes in Functional Outcome at Discharge from an Intensive Rehabilitation Hospital. *Diagnostics (Basel)*. 2020;11(1):38. doi: 10.3390/diagnostics11010038.

4. Hoh B.L., Putman C.M., Budzik R.F., Carter B.S., Ogilvy C.S. Combined surgical and endovascular techniques of flow alteration to treat fusiform and complex wide-necked intracranial aneurysms that are unsuitable for clipping or coil embolization. *J Neurosurg.* 2001;95(1):24-35. doi: 10.3171/jns.2001.95.1.0024.
5. Andaluz N., Zuccarello M. Treatment strategies for complex intracranial aneurysms: review of a 12-year experience at the university of Cincinnati. *Skull Base.* 2011;21(4):233-42. doi: 10.1055/s-0031-1280685.
6. Khe A.K., Chupakhin A.P., Cherevko A.A., Eliava S.S., Pilipenko Y.V. Viscous dissipation energy as a risk factor in multiple cerebral aneurysms. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* 2015; 30(5): 277–287. doi: 10.1515/rnam-2015-0025
7. Dhar S., Tremmel M., Mocco J., Kim M., Yamamoto J., Siddiqui A.H., Hopkins L.N., Meng H. Morphology parameters for intracranial aneurysm rupture risk assessment. *Neurosurgery.* 2008;63(2):185-96; discussion 196-7. doi: 10.1227/01.NEU.0000316847.64140.81.
8. Greving J.P., Wermer M.J., Brown R.D.Jr., Morita A., Juvela S., Yonekura M., Ishibashi T., Torner J.C., Nakayama T., Rinkel G.J., Algra A. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: a pooled analysis of six prospective cohort studies. *Lancet Neurol.* 2014;13(1):59-66. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70263-1.
9. Neyazi B., Swiatek V.M., Skalej M., Beuing O., Stein K.P., Hattingen J., Preim B., Berg P., Saalfeld S., Sandalcioglu I.E. Rupture risk assessment for multiple intracranial aneurysms: why there is no need for dozens of clinical, morphological and hemodynamic parameters. *Ther Adv Neurol Disord.* 2020;13:1756286420966159. doi: 10.1177/1756286420966159.
10. Gombolevskij V. A., Morozov S. P., Chernina V. Yu., editors. *Rukovodstvo dlya rentgenolaborantov po vypolneniyu protokolov issledovaniy na komp'yuternom tomografe: uchebno-metodicheskoe posobie.* Moscow: GBUZ «NPKC DiT DZM»; 2020. (In Russian)
11. Krylov V.V., Grin' A.A., Prirodov A.V., editors. *Cerebral'nye anevrizmy. Netravmaticheskoe subarahnoidal'noe krovoizliyanie. Metodicheskie rekomendacii.* Moscow: GBUZ NII SP im. N.V. Sklifosovskogo DZM; 2021 (In Russian)
12. Backes D., Vergouwen M.D., Tiel Groenestege A.T., Bor A.S., Velthuis B.K., Greving J.P., Algra A., Wermer M.J., van Walderveen M.A., terBrugge K.G., Agid R., Rinkel G.J. PHASES Score for Prediction of Intracranial Aneurysm Growth. *Stroke.* 2015;46(5):1221-6. doi: 10.1161/STROKEAHA.114.008198.
13. Yushkevich P.A., Piven J., Hazlett H.C., Smith R.G., Ho S., Gee J.C., Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage.* 2006;31(3):1116-28. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.01.015..
14. ANSYS. ANSYS Documentation, ANSYS CFX-Solver Theory Guide. <http://www.ansys.com/2006> .
15. Kuyanova Y.O., Chupakhin A.P., Parshin D.V., Presnyakov S.S., Dubovoi A.V. Numerical Study of the Tee Hydrodynamics in the Model Problem of Optimizing the Low-Flow Vascular Bypass Angle. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2019;60 (6): 1038–1045. doi: 10.1134/S0021894419060087
16. Kuianova Iu.O., Dubovoy A.V., Parshin D V . Towards the numerical assessment in solving the problem of the effectiveness of vascular anastomosis in neurosurgical operations. *Journal of Physics: Conference Series.* 2019; 1359:012085. doi 10.1088/1742-6596/1359/1/012085
17. Tikhvinskii D., Kuianova J., Kislitsin D., Orlov K., Gorbatykh A., Parshin D. Numerical Assessment of the Risk of Abnormal Endothelialization for Divertter Devices: Clinical Data Driven Numerical Study. *J Pers Med.* 2022;12(4):652. doi: 10.3390/jpm12040652.
18. Zarrinkoob L., Ambarki K., Wåhlin A., Birgander R., Eklund A., Malm J. Blood flow distribution in cerebral arteries. *J Cereb Blood Flow Metab.* 2015;35(4):648-54. doi: 10.1038/jcbfm.2014.241.
19. Etminan N., Rinkel G.J. Unruptured intracranial aneurysms: development, rupture and preventive management. *Nat Rev Neurol.* 2016;12(12):699-713. doi: 10.1038/nrneuro.2016.150.
20. Oliveira I., Gasche J. L., Militzer Ju., Baccin C. Hemodynamic and morphological case study of an intracranial aneurysm inception and evolution. 25th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019. 20-25 October. 2019. doi: 10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0516

*Для цитирования:* Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Бервицкий А.В., Обединская Н.Р., Тулупов А.А., Паршин Д.В. Динамическое наблюдение изменения морфологических и гемодинамических характеристик малых церебральных аневризм. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2023;12(1): 172-180. DOI: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-172-180

*To cite:* Tikhvinskii D.V., Kuyanova Yu.O., Bervitskiy A.V., Obedinskaya N.R., Tulupov A.A., Parshin D.V. Dynamic monitoring of morphological and hemodynamic evolution of small cerebral aneurysms. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2023;12(1): 172-180. DOI: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-172-180